

Jürgen Teichmann

Zur Entwicklung von  
Grundbegriffen der Elektrizitätslehre,  
insbesondere des elektrischen Stromes  
bis 1820

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der  
Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt am 9. 2. 1972



Jürgen Teichmann

Zur Entwicklung von  
Grundbegriffen der Elektrizitätslehre,  
insbesondere des elektrischen Stromes  
bis 1820

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der  
Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt am 9. 2. 1972



1. Berichterstatter: Prof. Dr. H. Gericke
  2. Berichterstatter: Prof. Dr. F. Bopp
- Mündliche Prüfung am 9. 2. 1972

# ZUR ENTWICKLUNG VON GRUNDBEGRIFFEN DER ELEKTRIZITÄTSLEHRE, INSBESONDERE DES ELEKTRISCHEN STROMES BIS 1820 <sup>1</sup>

von

Jürgen Teichmann

## 1. Einleitung

Diese Arbeit legt den Schwerpunkt der historischen Betrachtung auf die begriffliche Entwicklung in der Elektrizitätslehre von etwa 1550–1820. Dabei sollen die Zeitintervalle 1771–1791 (nur Entladungsströme) und 1791–1820 (Ströme aus chemischen Umsetzungen) eingehender untersucht werden. Die Zeitgrenzen werden durch die erste Veröffentlichung HENRY CAVENDISHs zur Elektrizität (1771), die Veröffentlichung der Experimente LUIGI GALVANI's (1791) und die tiefe Zäsur in der Elektrizitätslehre durch die Entdeckung HANS CHRISTIAN OERSTEDs 1820 gebildet.

Unter Grundbegriffen sollen nicht die der Maxwellschen Elektrodynamik verstanden werden, sondern die, die in der Zeit bis 1820 durch Modellvorstellungen und Meßmethoden definiert waren. Das sind vor allem die Begriffe (in moderner Benennung): Ladungsmenge, Kapazität, Spannung, Stromstärke, Widerstand. Die Begriffe Spannung und Kapazität wurden übrigens für die Entwicklung der Theorie der ‚galvanischen‘ Elektrizität sehr viel wichtiger als für die der Elektrostatistik, wo das Kraftgesetz (CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB u. a.) und damit die Ladungsmenge, sowie die abstrakte Potentialfunktion (SIMEON-DENIS POISSON, GEORGE GREEN) eine größere Rolle spielten. Die Beiträge von COULOMB, POISSON und GREEN sollen hier im übrigen außer Betracht bleiben.

Als Ordnungsprinzipien für die historische Vielfalt wurden einige wissenschafts-theoretische Ergebnisse herangezogen — jedoch nicht starr in die Betrachtung eingebaut — die natürlich an dieser Stelle nur sehr vereinfacht formuliert werden konnten:

A) Es besteht eine enge Wechselwirkung zwischen dem Betrachten von bzw. Experimentieren an Erscheinungen der Wirklichkeit und den Modellvorstellungen dazu, die mit Hilfe einer Fachsprache geordnet werden können.

---

1. Dieser Artikel enthält die Hauptergebnisse der Dissertation gleichen Titels, die Anfang 1972 an der Universität München vorgelegt wurde. (Zur Zeit im Druck bei Gerstenberg, Hildesheim; Reihe: Arbor scientiarum).

B) Die Begriffe dieser Fachsprache können in klassifikatorische, komparative und quantitative eingeteilt werden. Klassifikatorisch sollen Begriffe heißen, die nur Mengeneinteilungen von Phänomenen treffen, ohne endliche Größenrelationen zwischen ihnen festzulegen (etwa Leiter und Nichtleiter). Komparative Begriffe definieren schon eine Ordnungsstruktur (wie sie etwa die Leitfähigkeitsreihe darstellt). Erst quantitative Begriffe erlauben, zu einer algebraischen Struktur überzugehen, d. h. Verknüpfungen zu definieren (z. B. die Addition von Kapazitäten oder Widerständen). Quantitative Begriffe sind Voraussetzung, um Axiome einer Theorie in den exakten Naturwissenschaften formulieren zu können.

C) Gesetzmäßigkeiten werden in Allaussagen festgehalten, die durch Induktion aus einer endlichen Anzahl von Beobachtungen entstehen. In ihnen können die Begriffe, wie unter B) angeführt, verwendet werden (z. B. klassifikatorisch: alles Metall leitet die Elektrizität, alles Glas nicht).

D) Eine Theorie die aus bestimmten als grundlegend angesehenen Allaussagen=Axiomen abgeleitet wird, wird umso eher allgemein annehmbar sein, je besser sie folgende Forderungen erfüllt:

D,1) Die Widerspruchsfreiheit der Begriffe und Aussagen.

D,2) Kein Begriff darf verwendet werden, der für die Voraussage eines intersubjektiv beobachtbaren Ereignisses unnötig wäre. (Das ist die weiteste Fassung des empiristischen Sinnkriteriums von RUDOLF CARNAP<sup>2</sup>.)

D,3) Größtmögliche Einfachheit bei Vollständigkeit.

D,4) Fruchtbarkeit (d. h. die Theorie ermöglicht neue theoretische und experimentelle Ansätze).

Diese Forderungen waren vor allem Anregung für die Aufstellung folgender Fragen an die geschichtliche Entwicklung:

zu D,1) Wie weit wurde die mathematische Sprache verwendet?

zu D,2) Wie weit wurden Modellvorstellungen und ihre Begriffe durch Meßvorschriften kontrolliert, bzw. erweitert? Wie entstanden auf Grund des Vorliegens neuer Phänomene neue Begriffe?

zu D,3) Von welchen Gesetzmäßigkeiten wurde zunächst ausgegangen?

zu D,4) Welche neuen Erklärungen und experimentellen Ansätze wurden durch theoretische Entwicklungen möglich?

2. Zur Übersicht siehe STEGMÜLLER, WOLFGANG: *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie*, Stuttgart 1965, hier S. 461.

Eine Berechtigung zur Heranziehung dieser modernen wissenschaftstheoretischen Erkenntnisse für eine historische Untersuchung lieferte die Geschichte der Wissenschaftstheorie selbst. Sie fußt als „analytische“ oder „empiristische“ Philosophie im Empirismus des 17./18. Jahrhunderts, wie zahlreiche wissenschaftstheoretische Äußerungen seit GALILEI beweisen.

Doch waren auch spezifisch wissenschaftshistorische Fragestellungen notwendig, vor allem: Welche anderen Faktoren außer den unter D 1–4 genannten haben zumindest Zeitpunkt und historische Wirkung der verschiedenen Entwicklungen beeinflußt, (psychologische, soziologische Elemente)? So gilt etwa eine Allaussage – und mitunter damit eine ganze Theorie – in der empiristischen Philosophie nach einem einzigen widersprechenden Ergebnis als falsifiziert. Doch historisch war dieser Widerspruch meist nicht so einfach zu fassen und wenn doch, dann fehlte ein Ersatz für das ansonsten bewährte Wissen. – Wie hartnäckig ein Forscher an Axiomen festhalten darf, wie flexibel er sein soll, ist gerade auch an der Entwicklung der Elektrizitätslehre zu sehen.

## 2. Die ersten Ansätze zu Grundbegriffen (bis 1771)

Jede Beschreibung von Phänomenen, auch die einfachste, erfordert Begriffe, die meist aus anderen schon bekannten Vorstellungskreisen entnommen werden und damit unmittelbar ein theoretisches Element in jede Beobachtung tragen. Das ist auch bei den ersten elektrischen Beobachtungen in der Antike zu sehen. Hier gab die Anziehungskraft (schon das ist ein entlehnter Begriff) geriebenen Bernsteins auf leichte Teilchen Anlaß zu Modellvorstellungen von Ausströmungen aus dem anziehenden Körper, die die Wirkungen vermitteln sollten<sup>3</sup>. Erst GERONIMO CARDANO und WILLIAM GILBERT<sup>4</sup> verwendeten diese Ausströmungstheorie ausschließlich für elektrische Körper, da bei magnetischen die Wirkung durch dazwischengehaltene Materie nicht unterbrochen wurde. Von hier entwickelten sich die Begriffe Strom und Menge von elektrischer Materie, waren aber ausschließlich durch Phänomene außerhalb der elektrischen Körper angeregt (Funkenüberschlag, ‚elektrischer Wind‘ Empfindungen der Haut bei Annäherung an einen elektrisch geladenen Körper<sup>5</sup>). Das wurde mit der näheren Untersuchung der

3. ROLLER, DUANE und DUANE H. D. ROLLER: *The prenatal history of electrical science*, in: *American Journal of physics*, 21, (1953). S. 343–356; hier S. 350.

4. CARDANO, GERONIMO, *De Subtilitate, Libri XXI*, Basel 1611 [<sup>1</sup>1550]; hier Buch 5. GILBERT, WILLIAM: *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia nova*. London 1600; hier Buch 2, Kap. 2,4.

5. HAUKS BEE, FRANCIS: *Physico-mechanical experiments on various subjects containing an account of several surprizing phaenomena touching light and electricity, producible on the attrition of bodies*, London<sup>2</sup> 1719 [<sup>1</sup>1709].

Fortleitbarkeit der Elektrizität durch feste Körper langsam anders<sup>6</sup>. Die Ausströmungstheorie zur Erklärung der Kraftwirkungen blieb jedoch bis in die Mitte des 18. Jhs. ohne Konkurrenz, bis:

1. die Newtonsche Mechanik sich als Leitwissenschaft durchgesetzt hatte und
2. eine experimentelle Entdeckung – die Leidener Flasche 1745/46 – der alten Theorie unüberwindliche Schwierigkeiten bereitete.

Diese Schwierigkeiten entstanden bei der Erklärung der elektrischen Entladung, wurden aber von WILLIAM WATSON und BENJAMIN FRANKLIN durch den Begriff des geschlossenen Stromkreises aus der Hydromechanik überwunden<sup>7</sup>. WATSON etwa verwendete das Bild des Blutkreislaufs und verglich die Elektrisiermaschine mit einem Tierherz bzw. mit einer Pumpe. Damit wurde auch der Leiterstrom gegenüber den freibeweglichen „Effluvia“ favorisiert. Obwohl WATSON und FRANKLIN die elektrischen Kraftwirkungen noch durch elektrische Materie um den geladenen Körper herum vermitteln ließen, lag ihren Annahmen zugrunde, daß keine wesentliche Ladung unkontrollierbar als Ausströmung den Stromkreis verlassen konnte. Das kann man als Ladungserhaltungsprinzip bezeichnen. Nach FRANKLINS Theorie eines einzigen elektrischen Fluidums konnte dieses nur über die natürliche Menge im neutralen Status hinaus vermehrt werden, wenn an anderer Stelle Verringerung eintrat. (Zwischen Menge- und Dichtebegriff wurde weder bei WATSON noch bei FRANKLIN unterschieden). Neben diesem theoretischen Ansatz sorgte die Leidener Flasche auch für die Erweiterung der Meßmöglichkeiten. Nun standen sehr viel größere Ladungsmengen zur Verfügung, die mit den gleichen Kapazitäten mehrerer Flaschen bequem in konstanten Schritten verkleinert werden konnten.

Die beste Übersicht über den Stand der experimentellen und begrifflichen Entwicklung um 1767 liefert das Werk *Die Geschichte und der gegenwärtige Stand der Elektrizität* von JOSEPH PRIESTLEY, das in mehreren Auflagen und Übersetzungen erschien<sup>8</sup>. In ihm – und damit in dieser Zeit – wurden die Begriffe ‚Wirkung‘, ‚Stärke‘, ‚Menge‘, ‚Kraft‘, ‚Grad‘ der Elektrizität meist synonym verwendet. Komparative Meßvorschriften lieferten die mecha-

6. Siehe z. B. FRANKLIN, BENJAMIN: *Experiments and observations on electricity*, London<sup>4</sup> 1769 (die erste Auflage, die FRANKLIN selbst herausgab); hier S. 96 – die Stelle stammt aus dem Jahr 1751.

7. FRANKLIN, Anm. 6.  
WATSON, WILLIAM: *A continuation of a paper concerning electricity*. Gelesen 6. 2. 1746. Textdatum 20. 10. 1746. In: *Philosophical Transactions*, 44, (1746/1747), S. 695–749; hier S. 728.

8. PRIESTLEY, JOSEPH: *The history and present state of electricity with original experiments*, London<sup>3</sup> 1775 [1767]. Deutsche Übersetzung der 2. Auflage 1769 durch JOHANN GEORG KRÜNTZ, Berlin und Stralsund 1772.

nischen Wirkungen, die Lichtwirkungen, die Wärmewirkungen, die akustischen Wirkungen und die physiologischen Wirkungen im engeren Sinne (Erschütterungen). Zwar zeigten schon verschiedene Erfahrungen die unterschiedliche Abhängigkeit der Wirkungen von der „Quantität überzogener Oberfläche“ bzw. der „Stärke der Ladung“<sup>9</sup>, doch wurde der Schritt zur Unterscheidung zweier durch Meßvorschriften definierter Modellbegriffe Ladungsmenge und Spannung nicht vollzogen. Dagegen regte das Modellbild eines kreisenden Fluidums theoretisch verschiedene neue elektrische Begriffe an (Ladungsdichte, Speicherkapazität, Widerstand)<sup>10</sup>.

Eine Anzahl komparativer Gesetzmäßigkeiten wurde festgestellt und zum Teil auf quantitative extrapoliert, u. a.: die Elektrizität befindet sich nur auf der Oberfläche, ihre „Stärke“ (usw.) nimmt mit der belegten Metallfläche und der Dünne der zu isolierenden Schicht zu. Auf parallel geschaltete Kondensatoren kann man entsprechend mehr Elektrizität aufbringen. Die Existenz von wirkungsfreien Räumen im Inneren von geschlossenen geladenen Flächen und – dadurch mitangeregt – Analogien zur Gravitationswirkung führten schon zur Vermutung des umgekehrt proportionalen Zusammenhangs zwischen Kraft und Quadrat der Entfernung. Auch die Abhängigkeit des Widerstands von geometrischen Faktoren und vom Material wurde schon komparativ festgestellt<sup>11</sup>.

### 3. Die Beiträge von Henry Cavendish, Giambattista Beccaria und Alessandro Volta (1771–1791)

Die klare Unterscheidung zweier Begriffe Ladungsmenge und Spannung durch spezifische Meßvorschriften und die konsequente Anwendung dieser Erkenntnis auf weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen ist das Verdienst von HENRY CAVENDISH, GIAMBATISTA BECCARIA und ALESSANDRO VOLTA. Vergleicht man die wissenschaftlichen Leistungen der drei Forscher von modernen Standpunkten – ohne Bezug auf historische Relevanz – so bleibt CAVENDISH überlegen. Nicht nur besaß er als einziger profunde mathematische Kenntnisse und verband glänzende theoretische Phantasie mit experimentellem Geschick, er kam auch am weitesten in der Entwicklung quantitativer elektrostatischer und ‚elektrodynamischer‘ Grundbegriffe (Ladungsmenge, Spannung, Kapazität, Widerstand). Mit Hilfe

9. PRIESTLEY, Anm. 8, deutsche Üb., S. 362.

10. NOLLET, JEAN ANTOINE: *Lettres sur l'électricité*, Paris 1774–1777, 3 Bände. [<sup>1</sup> 1753 – ein Band]. NOLLET bezieht sich hier in Band 3, S. 196 auf PAULIAN, AIMÉ-HENRI: *Dictionnaire de physique*, 3 Bände, Avignon 1761; hier Band 2, S. 33.

11. PRIESTLEY, Anm. 8, deutsche Üb., S. 476, S. 486/487.

mechanischer Analogien (besonders zur Hydrostatik und Hydrodynamik) entwarf er 1771<sup>12</sup> ein widerspruchsfreies Modellbild der Elektrizität auch in mathematischer Sprache. Dazu ordnete er die Begriffe Ladungsmenge („Menge des elektrischen Fluidums“) und Spannung („Elektrisierungsgrad“) den mechanischen Begriffen Masse und Druck zu, den elektrischen „Widerstand“ dem hydrodynamischen Widerstand. Als erste und wichtigste Voraussetzung setzte er die elektrische Kraft umgekehrt proportional zu einer Potenz der Entfernung zwischen 1 und 3 an. Daraus zog er wichtige Folgerungen (etwa über das Kapazitätsverhältnis ähnlicher Körper), die er – nach der experimentellen Festlegung der Potenz 2 in genau angegebenen Fehlergrenzen<sup>13</sup> – in weiteren exakten Experimenten bestätigte. Er besaß exakte Meßvorschriften für Ladungsmengen und betonte, wie ungenau die allgemein üblichen Meßvorschriften seien. Die Untersuchungen über Ladungsmengen bei gleicher Spannung entsprachen Kapazitätsmessungen. Auch die spezifische Kapazität (Dielektrizitätszahl) wurde berücksichtigt. Die Meßvorschriften für die Spannung, Elektrometerausschlag und Funkenlänge, wurden selten benutzt, obwohl er ausführliche Eichkurven für Elektrometer aufstellte und die Funkenlänge proportional zur Spannung fand. Es genügte meist das Wissen, daß gleicher Ausschlag und gleiche Länge gleiche Spannung bedeuten.

Beim Widerstandsbegriff wurde ab 1773<sup>14</sup> der spezifische Widerstand in einigen Fällen bestimmt. Als Meßinstrument standen nur physiologische Wirkungen zur Verfügung. Die geometrische Abhängigkeit konnte er damit als Funktion des Quotienten von Länge und Querschnitt nachweisen, wobei er schließlich den proportionalen Zusammenhang annahm. Die Abhängigkeit von der Temperatur war ihm bekannt, doch wurde sie nicht weiter

12. CAVENDISH, HENRY: *An attempt to explain some of the Principal Phaenomena of electricity by means of an Elastic Fluid*, in: CAVENDISH, HENRY: *The scientific papers of the honourable H...C...F. R. S., Volume. 1. The electrical researches*. Hrsg. JOSEPH LARMOR, Cambridge 1921 [<sup>1</sup> 1879. Hrsg. CLERK MAXWELL]; hier § 1–139.

Ferner: CAVENDISH, HENRY: *Thoughts concerning electricity*. Manuskript, in: CAVENDISH, Anm. 12, § 195–216.

13. CAVENDISH griff bei seinen Experimenten auf den Beweis ISAAC NEWTONs für die fehlende Schwerkraftwirkung innerhalb einer mit Masse belegten Kugelschale zurück. Er untersuchte den Übergang der Elektrizität von einer Kugel auf zwei dünne genau passende Metallhalbkugelschalen, die über die Kugel gestülpt wurden. Siehe CAVENDISH, HENRY: *Experiments on electricity*. Manuskript, in: CAVENDISH, Anm. 12, § 217–394, hier § 217–235.

14. Siehe unter anderem CAVENDISH, HENRY: *Experiments*, 1773. Manuskript, in: CAVENDISH, Anm. 12, § 494–580, hier § 574–576.

CAVENDISH, HENRY: [*Experiments on*] *resistance to electricity*. Manuskript, in: CAVENDISH, HENRY: *Anm. 12, § 616–646; hier § 616–617.*

CAVENDISH, HENRY: *Experiments with the artificial torpedo*. Manuskript, in: CAVENDISH, Anm. 12, § 596–615.

CAVENDISH, HENRY: *An account of some attempts to imitate the effects of the Torpedo by Electricity*, in: CAVENDISH, Anm. 12, § 395–437.

untersucht. Statt eines quantitativen Begriffs Stromstärke verwendete er nur die komparativen Ausdrücke „durchgeströmte Elektrizität“, bzw. „velocity“ oder „rapidity“ und zwar recht widersprüchlich. Deshalb konnte er auch zu keinem vollständigen Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand kommen. Immerhin wurden die quantitativen Stromverzweigungsgesetze als ziemlich selbstverständlich angenommen. Auch erhielt er einen Teil des Ohmschen Gesetzes: die Spannung muß bei gegebener Ladungsmenge pro Zeit proportional zum Gesamtwiderstand sein. Auch die proportionale Abhängigkeit der Teilspannungen im Stromkreis von den Widerständen war ihm klar. Bei den Untersuchungen zum spezifischen Widerstand verwendete er gesättigte Salzlösung als Standard.

Wie kam CAVENDISH zu diesen Erkenntnissen? Für seine Elektrostatik gilt vor allem das Vorbild der Mechanik (insbesondere Hydrostatik) NEWTONs. CAVENDISH wollte ein geschlossenes System der Elektrizität entwickeln, das aus wenigen – möglichst materialunabhängigen – Axiomen alle weiteren Erfahrungssätze lieferte. Die Mathematik beherrschte er – einschließlich der Differentialrechnung in der Schreibweise NEWTONs – ausgezeichnet. In seinen unveröffentlichten Manuskripten über dynamische Probleme wollte er offenbar direkt an NEWTON anknüpfen<sup>15</sup>. Zu der Unterscheidung zweier Begriffe Ladungsmenge und Spannung dürfte sicher das Modell eines elastischen Fluidums mit den Begriffen Masse und Druck beigetragen haben, wie auch das experimentelle Problem der unterschiedlichen physiologischen Wirkungen von Leidener Flasche und einfachem Konduktor bei gleichem Elektrometerausschlag. Vor Entdeckung des Kondensatorprinzips war eine experimentelle Anregung kaum möglich, da die auffälligste Meßmethode für die Ladungsmenge (bei konstanter Spannung), die starke Erschütterung fehlte. Vielleicht hatte CAVENDISH dieses Problem in fremden Publikationen kennengelernt – etwa in PRIESTLEYs *Geschichte* . . . (vgl. Anm. 8). Auf dieses Werk wurde in seiner ersten Veröffentlichung 1771 sechsmal hingewiesen und in seiner wahrscheinlich ältesten vorhandenen – unveröffentlichten – Arbeit zur Elektrizität einmal (vgl. Anm. 12). Doch haben ihm auch die Veröffentlichungen von BENJAMIN FRANKLIN und FRANZ ULRICH THEODOR AEPINUS (letzteren zitierte er gleich zu Beginn seiner ersten Veröffentlichung) Anregungen geliefert.

Daß CAVENDISH bald den richtigen Modellbegriff Druck fand und das Bild eines elastischen Fluidums zwischen den Poren der Körper – mit dem

15. MCCORMMACH, RUSSELL KEITH: *The electrical researches of Henry Cavendish*, Cleveland, Ohio 1967 (University Microfilms, Ann Arbor, Michigan 1969), hier S. 29f.  
CAVENDISH, HENRY: *Remarks on the theory of motion*. Manuskript, in: CAVENDISH, Anm. 12, Volume 2, Chemical and Dynamical. Hrsg. EDWARD THORPE, Cambridge 1921, hier S. 415–430.

konkreten Beispiel der Luft – fruchtbar ausführte, lag auch an seiner Vertrautheit mit Gaseigenschaften durch eigene Experimente<sup>16</sup>. Scheiterte er beim theoretischen Ausbau dieser Experimente noch an der Kompliziertheit der Zusammenhänge zwischen mechanischen, thermodynamischen und chemischen Eigenschaften, so hatte er hier mehr Erfolg. Das mag auch der Grund für die Veröffentlichung der elektrostatischen Ergebnisse 1771 im Unterschied zu seinen früheren mechanischen Betrachtungen gewesen sein.

Der Anlaß zu seinen ausgedehnten Stromkreis-Untersuchungen ab 1773 dürfte das physiologische Problem der elektrischen Fische gewesen sein, Vielleicht hat es nur die schon 1771 angeschnittenen Fragen über den Zusammenhang zwischen physiologischen Wirkungen und den Begriffen Strom und Widerstand wiederbelebt. Bei der Klärung der hierbei auftauchenden physikalischen Fragen war vor allem die Unterscheidung der Begriffe Ladungsmenge und Spannung, sowie die Kenntnis der Stromverzweigungsgesetze nützlich. Letztere scheinen durch seine hydrodynamischen Modellvorstellungen nahegelegt worden zu sein. Die Klärung des Widerstandsbegriffs machte zwar eine Reihe ‚elektrodynamischer‘ Ansätze möglich, doch blieben sie begrenzt, weil der Begriff Stromstärke nicht geklärt wurde. Wie gut er mathematisches Wissen und experimentelles Geschick vereinigen konnte, zeigt auch seine weitgehende Beschränkung auf Abgleichexperimente, bei denen er eine geringere Information in Kauf nahm, um dafür unbekannte Abhängigkeiten seiner physikalischen Größen zu umgehen. Das gleiche Geschick zeigen seine Untersuchungen zur Meßgenauigkeit bei Parallel- und Serienschaltung des Meßinstruments (seines eigenen Körpers) mit dem Stromkreis (vgl. Anm. 14. CAVENDISH<sup>3</sup>). Auch sonst wurden die – systematischen – Fehler seiner Versuchsergebnisse, oft, wenn auch nicht konsequent, quantitativ abgeschätzt. Axiomatischen Aufbau wie in der Elektrostatik versuchte CAVENDISH bei seinen Stromuntersuchungen kaum, ein Zeichen, daß es ihm hier mehr um die Bewältigung isolierter Probleme als um ein Gesamtsystem mit klar umrissenem Modell und exakten Begriffen ging.

Auch BECCARIA unterschied 1772<sup>17</sup> deutlich und konsequent zwischen zwei Begriffen Ladungsmenge („Menge des elektrischen Feuers“) und Spannung („Dichteüberschuß des elektrischen Feuers“). Doch wurde der letztere Begriff – wie die Benennung anzeigt – dem Begriff „Dichte“ im Modellbild zugeordnet und nicht dem Begriff Druck. Als Fluidamodell

16. CAVENDISH, HENRY: *Three papers, containing experiments on factitious air*, in: CAVENDISH, Anm. 15, S. 77–101.

17. BECCARIA, GIAMBATISTA: *Dell'elettricismo artificiale*, Turin 1772. Ohne die entscheidenden Erkenntnisse und weniger umfangreich:  
BECCARIA, GIAMBATISTA: *Dell'elettricismo artificiale e naturale*, Turin 1753.

wurde vor allem die Luft benutzt. Die ganze Begriffswelt deutet auf BENJAMIN FRANKLIN hin (s. S. 66). BECCARIA formulierte den Zusammenhang Ladungsmenge = Kapazität x Spannung („Summe des Feuers“ = „Kapazität“ x „Dichteüberschuß“)<sup>18</sup>. Die geometrischen- oder gar Materialabhängigkeiten der Kapazität wurden jedoch nicht näher untersucht. Auch er gab wie CAVENDISH Spannungs- bzw. Ladungsmethoden durch Aufteilung einer konstanten Ladungsmenge auf gleichgroße Kapazitäten an. Doch versuchte er an keiner Stelle, damit Elektrometer zu eichen oder unterschiedliche Kapazitäten exakt zu vergleichen. Schließlich entstand auch der Name „Spannung“ aus dem mechanischen Modell elastischer Körper bei der Behandlung der „elektrischen Atmosphäre“, d. h. des elektrischen Kraftfeldes. BECCARIA folgte hier unmittelbar FRANKLINs Spuren, der 1751 eine geladene Leidener Flasche mit einer gespannten Feder verglichen hatte<sup>19</sup>. Der Begriff Dichte der Elektrizität wurde von BECCARIA allerdings noch weiterverwendet. Als Meßvorschrift für beide diente der Elektrometerrausschlag. Der angenommene proportionale Zusammenhang wurde nicht näher untersucht. Der klassifikatorische Strombegriff wurde mit dem Begriff Geschwindigkeit komparativ gefaßt.

Auch die Abhängigkeiten des Widerstands von geometrischen Faktoren waren BECCARIA komparativ klar. Er untersuchte dazu Funken und Erschütterungen bei Stromfluß durch verschieden lange und dicke Wasserschichten. Theoretisch wurde ein proportionaler Zusammenhang zumindest bei der Leiterlänge angenommen.

Ob BECCARIA die Arbeit von CAVENDISH 1771 (vgl. Anm. 12) bei Abfassung seines bedeutendsten Werkes (vgl. Anm. 17) kannte, ist nicht sicher. Er zitierte diese Arbeit nicht, obwohl CAVENDISH selbst zweimal, vor allem jedoch als „ausgezeichneter Experimentator“, erwähnt wurde. Die *Philosophical Transactions* las BECCARIA anscheinend regelmäßig, denn er veröffentlichte selbst in ihnen (1760, 1767, 1770). Sein Buch (vgl. Anm. 17) erschien Anfang Juni 1772. Im gleichen Jahr erschienen die *Philosophical Transactions* für 1771. Möglicherweise hatte jedoch BECCARIA zumindest Teile seines Buches schon 1771 fertig. Auch sein Buch von 1753 (vgl. Anm. 17), das nach April 1753 erschien, hatte er nach eigenen Angaben schon im Sommer 1752 geschrieben. Doch dürfte – wie bei VOLTA – die ausführliche mathematische Behandlung im ersten Teil von CAVENDISHs Veröffentlichung auf zu wenig Vorbildung gestoßen sein. Auch BECCARIA bezog sich öfters auf PRIESTLEYs Geschichte . . . (vgl. Anm. 8), vor allem aber auf BENJAMIN FRANKLIN (1753 auch auf NEWTONs Optik).

18. BECCARIA, Anm. 17, 1772; hier § 88: „somma del fuoco“ = „eccesso di densità“ (bzw. „difetto di densità“) x „capacità“.

19. FRANKLIN, Anm. 6, S. 32.

Mit Sicherheit stammt jedoch die Bezeichnung Kapazität von ihm selbst. Sein Zusammenhang Ladungsmenge = Kapazität x Spannung könnte als Analogieschluß aus der mechanischen Beziehung Masse = Volumen x Dichte entstanden sein, wie seine verwendeten Begriffe „Summe des Feuers“ bzw. „Menge“, sowie „Kapazität“ (als Fassungsvermögen für die Elektrizität) und „Dichte“ der Elektrizität zeigen. An einer Stelle verglich er auch fälschlich den Inhalt zweier Leidener Flaschen, anstatt der belegten Flächen. Die spezifisch elektrischen Erfahrungen, die er – wie andere auch – schon 1753 gemacht hatte, daß etwa die elektrischen „Zeichen“ proportional zur Belegungsfläche wachsen würden, vergaß er offenbar unter der Verlockung der mechanischen Analogie Volumen für kurze Zeit. Einen weiteren Hinweis auf die Benutzung dieser Analogie bildet sein Verzicht auf die Einbeziehung des Belegungsabstandes bei der Leidener Flasche in den Begriff Kapazität. Dazu konstruierte er einen übergeordneten Begriff (Äquivalenz), ohne diesen jedoch in seine Grundgleichung einzubauen. – BECCARIAs Trennung der Begriffe Ladungsmenge – Spannung dürfte sachlich durch das Problem der Erschütterungsexperimente bei gleichen Spannungen angeregt worden sein, die BECCARIA in Anknüpfung an FRANKLIN durchführte. Sie wurden durch diese Unterscheidung sofort durchsichtiger.

VOLTA unterschied 1778<sup>20</sup> als dritter Elektrizitätsforscher konsequent zwischen zwei Begriffen Ladungsmenge und Spannung („Menge der Elektrizität“, „Spannung der Elektrizität“, italienisch: *quantità* bzw. *tensione*) und wendete diese Unterscheidung ebenfalls fruchtbar an. Wie BECCARIA benutzte er als Meßmethoden für die Spannung die Elektrometeranzeige und die Funkenlänge, für die Ladungsmenge die Funkenstärke und (bei konstanter Spannung) die Erschütterung, letztere am häufigsten. Doch führte er weder Abgleichexperimente durch, noch untersuchte er die Abhängigkeit der Erschütterung von der Spannung. So blieben seine quantitativen Ergebnisse nur recht grobe Anhaltswerte. Er verglich damit vor allem Kapazitäten (d. h. Ladungsmengen bei konstanter Spannung). Die Benennung „Kapazität“ wurde noch konsequenter als die Benennung „Spannung“ benutzt. Er fand erstere bei einfachen Leitern nicht proportional zur Oberfläche, sondern stärker von der Länge als von der Breite der Leiter abhängig.

Später konstruierte er auf Grund der näheren Untersuchungen von Influenzwirkungen, die ihn schon 1778 beschäftigt hatten, seinen „Kondensator“, den er als „Mikroelektroskop“ verwendete<sup>21</sup>. Damit entdeckte er den

20. VOLTA, ALESSANDRO: *Osservazioni sulla capacità de' conduttori elettrici e sulla commozione che anche un semplice conduttore è atto a dare eguale a quella di una boccia di Leyden*, in: VOLTA, ALESSANDRO: *Le Opere*. Edizione Nazionale, Milano 1928 (Reprint New York u. a. 1968), 7 Bände, hier Band 3, S. 199–229.

21. VOLTA, ALESSANDRO: *Del modo di rendersensibile la più debole elettricità sia naturale, sia artificiale*, 14. 3. 1782, in: VOLTA, Anm. 20, Band 3, S. 269–300.

Zusammenhang, daß die Ladungsmenge proportional zur Kapazität und zur Spannung wuchs. (Die Kapazität wurde als Funktion des Quotienten aus Fläche und Abstand der Platten betrachtet). Dieser Zusammenhang wurde durch recht genaue Experimente – Aufteilung von Ladungsmengen durch gleichgroße Kapazitäten und Messung der Spannungen mit Elektrometern – bestätigt.

Das Problem der Meßgenauigkeit und des Meßbereichs bei Elektrometern, das bei seinen meteorologischen Interessen ab 1787<sup>22</sup> besonders wichtig wurde, führte ihn zu Eichversuchen an Elektrometern sowie zur Festlegung eines „Fundamentalgrads“, um die Reproduzierbarkeit von Spannungswerten zu verbessern und verschiedene Meßbereiche aneinander anschließen zu können. Die experimentellen und theoretischen Probleme, die dabei entstanden (etwa die Beziehung zwischen der Kraftwirkung und dem Abstand elektrischer Ladungen, zwischen der Spannung und dem Abstand von Kondensatorplatten), konnte er nicht überzeugend lösen. –

Auch er unterschied zwischen elektrostatischen und elektrodynamischen Phänomenen. Die Erschütterung wurde proportional zur Ladungsmenge und zur „Geschwindigkeit“ der Entladung angesetzt. Letzterer Begriff wurde mitunter schon als Ladungsmenge pro Zeit benutzt. Die Abhängigkeit vom Widerstand war komparativ klar. Dieser wurde zunächst ebenfalls nur komparativ, vor allem als spezifischer Widerstand, behandelt<sup>23</sup>. Als Maß diente die Entladungszeit. Damit wurde die komparative Abhängigkeit von spezifischen Materialeigenschaften, aber auch von geometrischen Faktoren geklärt. VOLTA stellte bei diesen Versuchen fest, daß die Spannung des Kondensators während der Entladung nicht proportional zur Zeit abfiel, doch zog er hieraus keine weiteren Folgerungen. –

VOLTA knüpfte in seinen Untersuchungen und Begriffsbildungen nachweisbar an BECCARIA an. Auch die veröffentlichten Arbeiten von CAVENDISH kannte er sehr wahrscheinlich. So teilte er in einem Brief vom 16. 7. 1773 mit, daß er sich über alles, was die „Qualität und Kraft der elektrischen Zeichen“ betrifft, informieren wolle, besonders aus den *Philosophical Transactions* der letzten zwei Jahre sowie dem Werk BECCARIAs aus dem „vergangenen Jahr“<sup>24</sup>. Am 3. 6. 1775 und am 10. 6. 1775 bezog sich VOLTA in Briefen explizit auf BECCARIAs Werk von 1772, – und auf seine

22. VOLTA, ALESSANDRO: *Briefe an Georg Christoph Lichtenberg über die elektrische Meteorologie. 1787–1788*, in: VOLTA, Anm. 20, Band 5, S. 29–307.

23. VOLTA, ALESSANDRO: *Della maniera di far servire l'elettrometro atmosferico portatile all'uso di un igrometro sensibilissimo. 1790*, in: VOLTA, Anm. 20, Band 5, S. 309–333.

24. VOLTA, ALESSANDRO: *Brief an Carlo Amoretti. 16. 7. 1773*, Manuskript, in: VOLTA ALESSANDRO: *Epistolario*. Edizione Nazionale, 5 Bände und ein Zusatzband, Bologna 1949–1966, hier Band 1, S. 61f.

früheren — doch kritisierte er hier nur die Theorie BECCARIAs über die Elektrizitätsverteilung und -bewegung im Isolator teil und der metallischen Belegung eines Kondensators. Am 27. 1. 1776 sprach er vom „großen Werk BECCARIAs von 1772“<sup>25</sup>.

Auf CAVENDISHs Arbeit von 1776 gibt es mehrere Hinweise, doch scheint er sie erst 1782 bei seinem Aufenthalt in London kennengelernt zu haben. CAVENDISHs mathematisch formulierter Theorie von 1771 konnte er dagegen sicher nicht folgen. So dürfte sich seine Unterscheidung von Ladungsmenge und Spannung 1778 vor allem auf BECCARIA gestützt haben. Dafür spricht auch die Ähnlichkeit vieler Experimente und die Gleichheit der Benennungen „Kapazität“ und „Spannung“, wenn auch BECCARIA sich enger an das Luftmodell anlehnte, während VOLTAs Spannungsbegriff dem Analogiebegriff Druck von CAVENDISH näherstand. Wie bei CAVENDISH und BECCARIA ist auch der Einfluß NEWTONs (zum Teil über FRANKLIN) nicht zu leugnen. VOLTAs Leistung gegenüber BECCARIA war es jedoch, die wesentlichen Erkenntnisse in Zusammenhang mit den Grundbegriffen konsequenter als dieser und ohne viel überflüssiges oder falsches Beiwerk verwendet zu haben und sie ebenso konsequent zur Erklärung von ihm erfundener oder erweiterter Apparaturen und Experimente herangezogen zu haben.

Folgende zwei Probleme dürften VOLTAs Entwicklung maßgeblich beeinflußt haben:

1. Die Influenzwirkung, die ihn zunächst zu praktischen Entdeckungen führte (Elektrophor 1775) und die ab 1778 quantitativ untersucht wurde,
2. die physiologischen Wirkungen. Bei VOLTA kann es am sichersten gelten, daß ihm die unterschiedlichen physiologischen Wirkungen von Kondensatoren verschiedener Kapazität bei gleicher Spannung die Trennung von Ladungsmenge und Spannung nahelegten. Sehr wahrscheinlich erinnerte er sich bei seinen Untersuchungen zur Kapazität, die durch den Elektrophor angeregt wurden, an die Lösung BECCARIAs, die ihm offenbar zunächst nicht erwähnenswert erschienen war. Wie bei CAVENDISH und BECCARIA implizierten die physiologischen Probleme auch bei VOLTA vor allem die Entwicklung der spezifisch ‚elektrodynamischen‘ Begriffe Widerstand und Stromstärke.

25. VOLTA, ALESSANDRO: *Tre lettere a Marsilio Landriani sull'elettroforo*, Manuskript, in: VOLTA, Epistolario, Anm. 24, Band 3, S. 153–161 hier S. 158 (27. 1. 1776).

## Die historische Wirkung der Erkenntnisse von Henry Cavendish, Giambatista Beccaria und Alessandro Volta.

CAVENDISHs Untersuchungen, zwischen 1770 und 1785 die besten Beiträge zur Elektrizitätslehre, hatten die geringste historische Wirkung. Das gilt natürlich für seine vielen unveröffentlichten Ergebnisse, aber auch für seine zwei Veröffentlichungen und hier vor allem für seine Elektrizitätstheorie von 1771. Volles Verständnis für seine Leistungen entwickelte erst GEORGE GREEN, der CAVENDISHs Theorie aber nach Abfassung seiner berühmten Arbeit von 1828 las.

Die zweite Veröffentlichung CAVENDISHs von 1776 fand sehr viel mehr Aufmerksamkeit, doch waren es vor allem die physiologischen Ergebnisse und die Verhältnisse der spezifischen Widerstände, die öfters – auch von VOLTA – zitiert wurden. Allerdings bezog niemand kritische Stellung dazu. CAVENDISHs wissenschaftliches Ansehen war so hoch, daß nicht nach den Experimenten gefragt wurde, die die angegebenen Verhältnisse der spezifischen Widerstände lieferten. (Seine Experimente zum exakten Kapazitätsvergleich in dieser Arbeit fanden auch keine Nachahmer.)

BECCARIAs Werk von 1772 blieb nicht so unbekannt wie die Arbeiten CAVENDISHs. 1776 entstand eine englische Übersetzung davon, an der BENJAMIN FRANKLIN wesentlichen Anteil hatte. TIBERIO CAVALLO zitierte es in seinem Buch von 1777, auch in seiner Abhandlung von 1788<sup>26</sup>.

Auch einige andere taten das, doch keiner außer Volta ging konsequent auf die begrifflichen Ansätze ein.

VOLTA's Arbeiten hatten nun wesentlich stärkere historische Wirkung als die BECCARIAs und CAVENDISHs. Die Gründe dafür sind:

1. Seine Fähigkeit zu prägnanter Darstellung.
2. Seine umfangreiche Korrespondenz, die ab 1778 immer wieder die Unterscheidung der Begriffe Ladungsmenge und Spannung betonte, sowie seine vielen Reisen und die damit verbundenen persönlichen Kontakte.
3. die Anlehnung der begrifflichen Neuerungen an wissenschaftlich nützliche und spielerisch verwendbare Apparaturen.

Doch waren es vor allem diese Apparaturen (Elektrophor, Kondensator), die VOLTAs Namen verbreiteten. Mit den neuen Begriffen konnten nur wenige umgehen. Nur die Benennung Kapazität wurde häufiger verwendet. Trotz-

26. CAVALLO, TIBERIO: *A complete treatise of electricity in theory and practice, with original experiments*, London 1777, hier S. 103.

dem sollte sein Einfluß nicht unterschätzt werden. Wichtiger jedoch war er bei VOLTAs eigener Entwicklung nach GALVANIs Veröffentlichung von 1791.

Es sind vor allem psychologische Faktoren (Begabung, Temperament, Kontaktfähigkeit), die für die unterschiedlichen Beiträge und historischen Wirkungen der drei behandelten Wissenschaftler verantwortlich waren. Doch spielte auch die unterschiedliche Vorbildung und die gesellschaftliche Umgebung eine bedeutende Rolle. So ist es fraglich, ob ein so prinzipiell ungeselliger Wissenschaftler wie HENRY CAVENDISH zu dieser Zeit außerhalb Englands überhaupt die Plattform gefunden hätte, wie sie ihm in der Royal Society zur Verfügung stand. VOLTAs bürgerliche Herkunft und Erziehung paßten dagegen gerade in die aufgeklärte französisierte Welt. Persönlichkeitsmerkmale und Umwelteinflüsse hingen zusammen: Das Fehlen stärkerer gesellschaftlicher Bindungen erlaubte es CAVENDISH, theoretische und experimentelle Betrachtungen durchzuführen, die dem allgemeinen wissenschaftlichen Standard der Gesellschaft weit vorgriffen, während VOLTA und zunächst auch BECCARIA in engem Disput mit ihrer wissenschaftlichen Umwelt standen und auf deren Probleme und Anerkennung angewiesen waren.

#### 4. Die Entwicklung von 1791 bis 1820 unter besonderer Berücksichtigung der Arbeiten von Alessandro Volta und Johann Wilhelm Ritter

Wesentlich für die scharfe Trennung zweier komparativer Begriffe Ladungsmenge und Spannung auch nach Entdeckung der galvanischen Phänomene waren (auf das Problem Stromstärke = Ladungsmenge pro Zeit soll danach eingegangen werden):

1. die Vertrautheit mit elektrostatischen Phänomenen und deren Klärung durch die Begriffe Ladungsmenge und Spannung. (Das galt für VOLTA, nicht für RITTER).
2. das Aufstellen der Frage nach der Identität von galvanischem und elektrischem Fluidum und deren positive Beantwortung. (Andernfalls war die Spannung bei der galvanischen Elektrizität, da sie mit den einfachen Elektroskopen vor 1800 kaum festgestellt werden konnte, auch keine Funkenübersprünge bemerkbar waren, zunächst nicht besonders wichtig. Es lag da natürlich fern, diese fehlenden Phänomene – auch die fehlende Leitung durch Flammengase, d. h. den großen Stromverlust durch den großen Widerstand – durch komparative Veränderung einer Größe aus der Elektrostatik, nämlich der Spannung, zu beschreiben.)

3. die Erfindung der Voltasäule. (Durch sie wurden a) die Meßmöglichkeiten von Spannung und Stromstärke verbessert. Bei letzterer heißt das: stärkere physiologische Wirkungen, Wärmewirkungen in Stromleitern, Funken, chemische Wirkungen. Ferner wurden b) die Veränderungen der nun größeren Stromstärke unabhängig von der Spannung leichter beobachtbar, indem man den Gesamtwiderstand gezielt veränderte. Dem entsprach in der Elektrostatik die Möglichkeit, mit parallel geschalteten Kondensatoren die verfügbare Ladungsmenge zu erhöhen, während die Spannung konstant blieb. Doch waren die Wirkungen des Entladungsstromes einer einzigen Leidener Flasche schon so groß, daß sie auch ohne Parallelschaltung ausreichten – gegenüber noch geringeren Kapazitäten – die Begriffstrennung zwischen Ladungsmenge und Spannung nahezulegen.)

VOLTA stellte die Frage nach der Identität sofort nach Durchführung eigener galvanischer Experimente. Die Begriffe Ladungsmenge und Spannung aus der Elektrostatik brachten ihm schon 1792 genügend Argumente dafür. Mit diesen Begriffen konnte er die unterschiedliche Wirkung elektrischer Ströme, die durch „Metallkontakt“ und die durch „Maschinen“ erzeugt wurden, einfach erklären<sup>27</sup>. (Diese Begriffstrennung erschien allerdings in den 1792 bis 1800 veröffentlichten Arbeiten nicht so klar wie vorher und später.) VOLTAs Anliegen war zudem nicht romantisch-naturphilosophisch, eher rationalistisch. Er versuchte, einer Spezialdisziplin möglichst einfache Grundlagen zu geben. Dazu paßte die Vorstellung eines elektrischen Fluidums und auch die Vorstellung der Kontakterzeugung der galvanischen Elektrizität analog zur Erzeugung der Reibungselektrizität durch bloßen Kontakt. Die Spezialdisziplinen sollten klar voneinander getrennt bleiben.

Auch RITTER stellte die Frage nach der Identität zwischen galvanischer und gewöhnlicher Elektrizität und behaute sie mit mechanischen Analogien<sup>28</sup>. Es ist nicht klar, ob die Bewunderung für VOLTAs Argumentation oder das philosophische Anliegen der Einheit aller Naturkräfte hauptverantwortlich dafür waren. Zumindest flossen sofort umfangreiche Spekulationen in seine Überlegungen ein. Von Elektrostatistik wußte er um diese Zeit (1798) wenig.

- 
27. VOLTA, ALESSANDRO: *Account of some discoveries made by Mr. Galvani of Bologna*, 2 Briefe an TIBERIO CAVALLO und Manuskripte. September 1792–Dezember 1793, in: VOLTA, Anm. 20, Band 1, S. 169–248; hier S. 220 (wahrscheinlich zwischen Mai und Dezember 1793). VOLTA, ALESSANDRO: *Mémoire sur l'électricité excitée par le contact mutuel des conducteurs même les plus parfaits*, Manuskripte zu Briefen an MARTINUS VAN MARUM, 1796–1797, in: VOLTA, Anm. 20, Band 1, S. 459–490, hier S. 488.
28. RITTER, JOHANN WILHELM: *Schreiben an A. Volta bei Übersendung des Beweises, daß ein beständiger Galvanismus den Lebensproceß im Thierreiche begleitet; – im Junius 1798*, in: RITTER, JOHANN WILHELM: *Physisch-Chemische Abhandlungen in chronologischer Folge*, 3 Bände, Leipzig 1806, Band 1, S. 59–90, hier S. 62.

Experimente dienten vor allem zur Bestätigung seiner vorgefaßten Meinungen. Die Identität war ihm offenbar von Anfang an zu selbstverständlich. Komparative bzw. quantitative Bestimmungen lagen ihm ferner als klassifikatorische, so daß er nicht auf zwei unterschiedliche Begriffe stieß, sondern mit einem einzigen Begriff-analog zum Massebegriff der Mechanik operierte<sup>29</sup>.

VOLTA begnügte sich nicht mit plausiblen theoretischen Überlegungen, sondern suchte — auch beeinflusst durch CAVENDISH — quantitative experimentelle Beweise für die Identität. Wie aus verschiedenen Anzeichen zu vermuten ist, stieß er deshalb bei der Suche nach höherer Spannung der „galvanischen“ Elektrizität auf die Säule. Auch dann blieb VOLTA vor allem am weiteren Ausbau des Identitätsnachweises interessiert. So wendete er sofort seine Elektrometer direkt zur Spannungsmessung an und kam 1801<sup>30</sup> durch naheliegende Analogie zur Elektrostatik und wahrscheinlich auch auf Grund der Arbeit von CAVENDISH 1776 dazu, die komparativen Ansätze Spannung und Stromstärke als Grundbegriffe zu verankern. Die Verwandtschaft mit Erscheinungen der Reibungselektrizität (Entladungsströme) war so verführerisch, daß die Unterschiede zunächst übersehen wurden. —

RITTER kam auch jetzt aus seinem simplifizierenden polaren Denken nicht heraus. Auch blieben Wissenslücken in der Elektrostatik. Ihm genügten die elektrometrischen (d. h. mechanischen) Wirkungen der Säule zum endgültigen Beweis der Identität. Die neuen chemischen und physiologischen Wirkungen interessierten ihn zunächst mehr phänomenologisch, weniger komparativ-quantitativ bezüglich einer gemeinsam zugrunde liegenden elektrischen Größe. So übernahm er schließlich (1801) nur das Ergebnis VOLTAs, d. h. die Unterscheidung zweier Begriffe<sup>31</sup>. (Das ist bisher bei Vergleichen zwischen VOLTA und RITTER nie beachtet worden.)

Die Trennung von Quantitäts- und Intensitätsmaß in Analogie zur Elektrostatik war ein erster Schritt auf dem Weg der begrifflichen Fassung der Theorie des elektrischen Stromes. Ein zweiter war die Abgrenzung dieser Analogie, d. h. die Definition des Begriffs Stromstärke. Hier tauchten sowohl für VOLTA als auch für RITTER größere Schwierigkeiten auf. Die Analogie zur Hydrodynamik führten beide nicht konsequent durch, weil ihnen die entsprechenden Kenntnisse fehlten. So definierte zwar VOLTA den Begriff

29. Siehe Anm. 28. Ferner RITTER, JOHANN WILHELM: *Beyträge zur nähern Kenntniß des Galvanismus und der Resultate seiner Untersuchung*, Jena 1800 bis 1805, Band 1 (Stück 1+2, Stück 3+4), Band 2 (Stück 1, Stück 2, Stück 3+4), hier Band 1, Stück 1+2, S. 161/162.

30. VOLTA, ALESSANDRO: *Memoria . . . sull'identità del fluido elettrico col fluido galvanico*; November 1801, in: VOLTA, Anm. 20, Band 2, S. 45–105.

31. RITTER, JOHANN WILHELM: *Von der Galvanischen Batterie, nebst Versuchen und Bemerkungen, den Galvanismus überhaupt betreffend*. Sommer 1802, in: RITTER, Anm. 29, Band 1, Stück 3+4, S. 195–290, hier S. 233/224.

Elektrizitätsmenge/Zeit als neue dynamische Größe<sup>32</sup>, doch sah er offenbar keine Bereicherung darin. Er differenzierte nicht endgültig zum Begriff Geschwindigkeit und blieb lieber bei elektrometrischen Untersuchungen, bei denen der Begriff Ladungsmenge ausreichte, wenn er mit gleichen Zeiten operierte. VOLTA wäre sicher durch die Magnetnadel als Meßinstrument – hätte er sie noch während seiner wissenschaftlich aktiven Zeit erlebt – zu einer wesentlich klareren Explikation seines Stromstärkebegriffs gekommen. Theoretische Sorglosigkeit führte ihn auch bei dem Vergleich zwischen Leidener Flasche und Voltasäule in die Irre, da er das komparative Konzept konstante Ladungsmenge/Zeit auf eine Kondensatorentladung übertrug<sup>33</sup>.

RITTERs Begriff „Aktion“ blieb rein phänomenologisch, da RITTER wenig Verhältnis zur Elektrostatik hatte und diesen Begriff naturphilosophisch offenhalten wollte. Er war nur durch die verschiedenen Wirkungen der Säule und nicht durch ein Modell festgelegt (wobei die nur von der Spannung abhängigen Wirkungen nach 1801 ausgeschlossen blieben). Allerdings drängte sich auch RITTER die Vorstellung eines fließenden elektrischen Stroms häufig auf, ohne daß er jedoch diese Modellvorstellung komparativ in Analogie zur Hydrodynamik ausbaute. Deshalb konnte bei ihm keine Unsicherheit zwischen Ladungsmenge/Zeit und Geschwindigkeit entstehen. Er arbeitete im Gegensatz zu VOLTA den Unterschied zwischen konstanter Wirkung und Entladungswirkung komparativ heraus<sup>34</sup>, doch fehlte ihm das mathematische Rüstzeug zu eingehender Behandlung.

Für klassifikatorische bis komparative Stromuntersuchungen verwendeten beide

1. physiologische Wirkungen, vor allem Erschütterungen, aber auch klassifikatorisch die Geschmacksempfindung. Beide untersuchten auch – vorwiegend wohl im physiologischen Interesse – Lichtempfindungen, Tonempfindungen. VOLTA stand schließlich diesen Meßmöglichkeiten sehr skeptisch gegenüber, weil er hier keinen Ansatz zu quantitativen Experimenten sah.

2. chemische Wirkungen. VOLTA benutzte sie fast gar nicht zu Meßzwecken, wohl weil seine Kontakttheorie chemische Vorgänge bei der Stromerzeugung hartnäckig als nebensächlich betrachtete und diese Behauptung gegen ständige Angriffe der elektrochemischen Theorie zu verteidigen hatte. RITTER dagegen machte geschickte Vorschläge zur Verwendung der

32. VOLTA, Anm. 30, S. 75.

33. VOLTA, Anm. 30, S. 75, 80, 82/83.

34. RITTER, JOHANN WILHELM: *Von der Galvanischen Batterie nebst Versuchen und Bemerkungen den Galvanismus überhaupt betreffend*. 1802 (Fortsetzung der Arbeit aus Anm. 31), Band 2, Stück 2, hier S. 68.

Gasentwicklung und benutzt diese auch als Meßmethode für die „Aktion“. Doch hatte er weder Interesse noch Geduld, ihre komparative bis quantitative Verwendung zu vervollkommen.

3. Wärme- und Lichtwirkungen. Von VOLTA wurden kaum Versuche mitgeteilt, die Temperaturerhöhungen oder Schmelzwirkungen behandeln. Von RITTER wurden vor allem die Dicke der Funken und ihre Verbrennungswirkungen (an einem Goldblättchen) als komparatives Maß verwendet.

4. mechanische Wirkungen. VOLTA versuchte als Maß für die Stromstärke die Zeiten heranzuziehen, die Säule wie Reibungselektrisiermaschine brauchten, um eine bestimmte Kapazität auf eine bestimmte Spannung (durch Elektroskopausschläge gemessen) zu laden. Doch scheiterte er wieder an seinem starren Konzept eines konstanten Stromes.

Das Verdienst beider war es, die ganz verschiedenen beeinflussbaren Wirkungen als Maß einer einzigen Größe zu verwenden, der Stromstärke (in moderner Benennung). Hier stand natürlich die Erkenntnis der Identität zwischen Reibungselektrizität und galvanischer Elektrizität helfend zur Seite. Allgemein war es die Schwierigkeit, in getrennten Spezialwissenschaften (Chemie, Physik, Physiologie) gemeinsame Begriffe zu finden, d. h. die wissenschaftstheoretische Forderung größtmöglicher Einfachheit bei der Aufstellung von wissenschaftlichen Aussagen zu erfüllen. Dazu führten sowohl VOLTAs Kontakttheorie wie auch RITTERs naturphilosophische Ansichten, so viel Einseitigkeit bzw. Übertreibung man ihnen auch sonst vorwerfen kann.

Die Erfahrung VOLTAs in der Elektrostatik, wo er schon zu elektrodynamischen Vorstellungen gekommen war, hatte auch den zweiten spezifisch elektrodynamischen Begriff, den Widerstandsbegriff vorbereitet, vor allem seine Vorstellung als Materialkonstante. Er stand ab 1800 ebenfalls im Zentrum der Untersuchungen, da nur mit seiner Hilfe die qualitativen Änderungen am Stromkreis (verschiedene Flüssigkeiten in der Säule, Mensch und Tier als physiologisches Reagens, usw.) und damit die komparativ bis quantitativ festgestellten Veränderungen der Wirkungen auf komparative bis quantitative Veränderungen einer einzigen physikalischen Größe zurückführbar waren.

In der Explikation des Kehrwertes des Widerstandes, des Leitwerts, kam RITTER weiter als VOLTA. Aus komparativen Versuchen schloß er, daß der Leitwert proportional zur Leitfähigkeit und zur Querschnittsfläche und umgekehrt proportional zur Länge wachsen müßte<sup>35</sup>. Doch gelang es ihm auf

35. RITTER, JOHANN WILHELM: *Diktate aus Vorlesungen über den Galvanismus, gehalten zu Jena im Winter 1803 bis 1804. Erster Teil. Die einfache Kette*, in: RITTER, Anm. 28, Band 3, S. 262–307, hier S. 280/281.

Grund seiner geringen mathematischen Kenntnisse nicht, zu erkennen, wieviel geeigneter zur Erklärung der Vorgänge im einfachen Stromkreis der Widerstandsbegriff statt des Leitwerts war. VOLTA konnte sich zum Widerstandsbegriff durchringen, doch war auch sein mathematisches Wissen gering und seine geistige Beweglichkeit um diese Zeit (1802) schon eingeschränkt<sup>36</sup>. Auch machte ihm das Fehlen eines rein physikalischen Meßinstruments für die Stromstärke diese zwei Begriffe uninteressanter als die Spannung. Die Konstanz des Widerstands unabhängig von den anderen zwei Größen wurde nicht in Zweifel gezogen (im Gegensatz zu CAVENDISH). Genauere Analogiebetrachtungen zur Mechanik fehlten jedoch völlig.

Daß die Annahme eines einzigen Begriffs als komparative Erklärung für die komparative Veränderung aller die Stromstärke beeinflussenden Parameter keineswegs selbstverständlich war, zeigte der Einwand LUDWIG GILBERT's bei RITTERs Behandlung des Innenwiderstands einer Säule: Er wollte – ähnlich HUMPHRY DAVY – die Plattengröße als eigenständige Variable berücksichtigt wissen, da von ihr die Erzeugung der Elektrizität quantitativ abhinge<sup>37</sup>. Allgemeiner lag hier das Problem zugrunde, sich statt primär der Ursache der Erscheinungen (die Voltasäule als Erzeuger von Elektrizität; das führte zu dem Gegensatz Kontakttheorie – chemische Theorie) nur ihrem Verhalten zuzuwenden (die Voltasäule und der übrige Stromkreis als Leiter von Elektrizität; das brachte auch den großen Erfolg von GEORG SIMON OHMs Untersuchungen 1825/26). Ähnlich war in der Elektrostatik der Übergang von der Frage nach der Herkunft und Art der Reibungselektrizität zu Fragen nach der in den verschiedenen Körpern verschieden viel enthaltenen Menge von Elektrizität gewesen. Wichtigste Voraussetzung hierfür war das Ladungserhaltungsprinzip. Wichtigste Voraussetzung für den Beginn der komparativ-quantitativen Untersuchungen am Stromkreis war die Kontinuitätsgleichung, die sowohl von VOLTA wie von RITTER bald nach Aufnahme ihrer Experimente als ziemlich selbstverständlich angenommen wurde. RITTERs Sprunghaftigkeit hinderte ihn, sich zu fest an eine bestimmte Theorie zu binden, doch blieb er bei der Behandlung komparativer bis quantitativer elektrischer Probleme vor allem Physiker. Ihm kamen sowohl die Vorteile der Beschäftigung mit der chemischen Theorie zugute (vor allem die Verwendung der chemischen Wirkungen als Meßvorschrift), als auch die der Kontakttheorie VOLTAs (vor allem die Erklärung des Elektrolyteinflusses mit Hilfe des Begriffs Innenwiderstand). VOLTA dagegen stand zu fest auf dem Boden der Kontakttheorie.

36. Siehe z. B. VOLTA, ALESSANDRO: Brief an Martinus van Marum. 22. 6. 1802, in: VOLTA, Anm. 20, Band 4, S. 221–230.

37. Siehe GILBERT, LUDWIG: *Anmerkung zu Ritter, Johann Wilhelm: Neue Versuche und Bemerkungen über den Galvanismus*. 15. 11. 1804, in: *Annalen der Physik*, 19, (1805), S. 1–44.

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs der drei Größen Spannung, Stromstärke, Widerstand entstand die besondere Schwierigkeit, daß sich bei Änderungen am Stromkreis nur ein Teil der Größe Widerstand veränderte und damit der Schluß auf die umgekehrte Proportionalität zwischen Stromstärke und Widerstand bei konstanter Spannung nur bei Berücksichtigung des ganzen Leitungskreises möglich war. Auch die Entdeckung, daß nur bei bestimmten Versuchen der proportionale Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung – wenn überhaupt – gelten könnte, setzte zur Klärung die Kenntnis über das Leitungsverhalten des Gesamtkreises voraus: Die Verstärkung der Spannung wurde vor allem durch Vermehrung der Plattenzahl erreicht. Dann mußte aber der Innenwiderstand sehr viel kleiner als der Außenwiderstand sein, damit die Stromstärke allein eine Funktion der Spannung war.

Auf diese Weise stießen RITTER und VOLTA ab 1802 zu einer Skizzierung des Ohmschen Gesetzes in der Form  $\text{Stromstärke} = \text{Spannung} \times \text{Gesamtleitwert}$  vor. Die entsprechende Stelle bei VOLTA lautet:

Laßt uns schließen, daß die Geschwindigkeit des elektrischen Stromes und folglich die Kraft der Erschütterung, die man erfährt, im Verhältnis zusammengesetzt ist aus der elektrischen Spannung und der Freiheit oder Leichtigkeit des Durchgangs durch alle Teile der Kette oder des Kreises.

Bei RITTER gab es mehrere Ansätze unterschiedlicher Klarheit. Der Voltaschen Äußerung am ähnlichsten ist folgende Formulierung:

Du wirst aber finden . . . daß das Produkt aus vorhandener Spannung u. Leitung im Kreise irgend einer Säule = ist ihrer jedesmaligen Wirkung.

Daß RITTER hier wirklich die Gesamtleitung meinte, geht aus den nachfolgenden Beispielen hervor<sup>38</sup>.

Es ist kein Zufall, daß so schnell nach Entdeckung der Säule, bevor noch ihre vielfältigen Effekte genügend untersucht waren, dieses Ergebnis erreicht wurde. Gerade auch das unvollkommene Wissen, das VOLTA und RITTER 1802 besaßen, führte dazu, aus komparativen Ergebnissen auf die einfachsten Zusammenhänge zwischen den drei Grundgrößen zu schließen. Auch sie mußten schon über manche Effekte hinwegsehen (vor allem über das Nachlassen der Wirkungen auf Grund der chemischen Veränderungen an den

38. Zu VOLTA siehe Anm. 36.

RITTER, JOHANN WILHELM: Brief an Hans Christian Oersted. 4. 8. 1804, in: OERSTED, HANS CHRISTIAN: *Correspondance de H. C. Ørsted avec divers savants*, Hrsg. M. C. HARDING, 2 Bände, Kopenhagen 1920, hier Band 2, S. 89.

Elektroden und am Elektrolyt), die, später genauer untersucht, das Bild komplizierten. Wesentlich jedoch für die Schwierigkeiten, die RITTER und VOLTA bei der Aufstellung hatten – und die es ihren Zeitgenossen erschwerten, auf den Zusammenhang zu kommen – waren weniger fehlende konstante Elemente oder exakte Instrumente, d. h. die ausstehenden Entdeckungen in der Elektrochemie und im Elektromagnetismus, sondern zu geringe Kenntnisse in Hydrodynamik und Mathematik. Sonst hätten Modellvorstellungen das Gesetz plausibel machen können und geschicktere Abgleichexperimente für eine bessere experimentelle Bestätigung angeregt. Dazu kamen bei VOLTA die oben erwähnten Voreingenommenheiten.

### Die historische Wirkung der Erkenntnisse Alessandro Voltas und Johann Wilhelm Ritters

Die Entwicklung bis 1820 zeigt, daß das beste Ergebnis von RITTER und VOLTA, die additive Zusammensetzung von Innen- und Außenwiderstand, kaum Anhänger fand. Die grundlegende Bedeutung dieser Zusammensetzung für das Verständnis der komparativen bis quantitativen Veränderungen im Stromkreis wurde nicht erkannt. Zu den Gründen läßt sich folgendes sagen:

VOLTAs eingehendste Stellungnahme dazu in einem Brief an MARTINUS VAN MARUM (vgl. Anm. 36) blieb unveröffentlicht. VAN MARUM und CHRISTIAN HEINRICH PFAFF (der vielleicht aus dieser Quelle etwas erfahren hatte), hatten nicht die Begabung, das umfassende Wissen und den Mut, einen Weg selbständig weiterzugehen, den VOLTA – selbst zögernd – gerade erst eröffnet hatte. Ein theoretisches Modell, bei dem nur die meßbaren Größen (Leitwerte im Stromkreis, Spannung, Stromstärke) und nicht die Rechtfertigung der ersten Annahmen dabei (der Metallkontakt oder die chemischen Veränderungen als Ursache der Stromerzeugung) interessierten, war wenig begehrt. Natürlich spielte dabei die Unsicherheit in mathematischen Fragen – selbst elementarer Bereiche – die Hauptrolle. Hier wirkte die scharfe Trennung zwischen Physik als Experimentalwissenschaft und Mathematik (die auch die mathematische Physik, vor allem Mechanik und geometrische Optik enthielt) besonders schädlich. Es konnte eben kein Experimentalforscher, auch VOLTA selbst nicht, das Programm einer exakten Wissenschaft der Elektrizität analog zur bewunderten Mechanik NEWTONs durchführen. Das ging auch nicht – wenigstens zunächst nicht – in der axiomatischen Form, wie NEWTON sie begonnen hatte und wie sie das ganze 18. Jahrhundert hindurch vervollkommen wurde. Abgesehen von der Elektrostatik, wo das Kraftgesetz analog zum Gravitationsgesetz als wichtigstes Axiom vorhanden war, und von CAVENDISH 1771 und SIMEON-DENIS POISSON 1811 auch an den Anfang gesetzt wurde, waren

in der Elektrizitätslehre bis 1820 nur singuläre Probleme zu lösen, die noch dazu nicht durch quantitative Messungen aufbereitet waren. So interessierte sich kein Theoretiker dafür. Erst neue Ansatzmöglichkeiten für mechanische Analogien, etwa die Verknüpfung von Magnetostatik und elektrodynamischen Phänomenen 1820, bzw. exakte Meßmethoden und ihre Ergebnisse weckten damals Interesse bei theoretisch begabten Forschern (z. B. bei ANDRÉ MARIE AMPÈRE und bei GEORG SIMON OHM). Daß das nicht so sein mußte, zeigen die Untersuchungen von CAVENDISH zwischen 1773 und 1781.

Es ist ganz deutlich, daß der scharfe Gegensatz mancher Anhänger der chemischen Theorie zu VOLTAs Kontaktmechanismus bei der Stromerzeugung das größte Hindernis bei der Einführung des Begriffs Innenwiderstand und damit der einheitlichen Behandlung des Stromkreises darstellte. Am besten läßt sich dieses Problem bei LOUIS JOSEPH GAY-LUSSAC und LOUIS JACQUES THÉNARD verfolgen, die sowohl von der Kontakttheorie herkamen (über JEAN BAPTISTE BIOT) und den Begriff Innenwiderstand benutzten, als auch die chemische Theorie nicht fallen lassen wollten und so die mit Hilfe des Begriffs Innenwiderstand erreichten ersten Ergebnisse nicht weiter verfolgten<sup>39</sup>. Was man also auch der Kontakttheorie vorwerfen mag, hier hatte sie eindeutig positive Konsequenzen. Das erklärt wahrscheinlich auch die Tatsache, daß GEORG SIMON OHM 1825/26 als Vertreter der Kontakttheorie auftrat, obwohl er sich sonst wenig mit Fragen nach dem Wesen der Elektrizität befaßte<sup>40</sup>.

Daß VOLTA die Macht gehabt hätte, kraft seines Ansehens durch wissenschaftliche Leistungen und rhetorisches Können, die Zusammensetzung von Innen- und Außenwiderstand und damit auch den Ohmschen Zusammenhang weitgehend durchzusetzen, zeigt die Wirkung seiner Untersuchungen zur Identität von galvanischer Elektrizität und Reibungselektrizität. Hier gab es nach 1802 selbst unter den Forschern, die seine rein physikalische Kontakttheorie ablehnten, keinen mehr – zumindest nicht in der ersten Garnitur – der ein eigenes galvanisches Fluidum propagierte. HUMPHRY DAVY etwa, sowie LOUIS JOSEPH GAY-LUSSAC und LOUIS JACQUES THÉNARD waren weit davon entfernt. Diese Identität war um 1820 selbstverständlich, selbstverständlicher noch als die Unterscheidung zweier Begriffe Ladungsmenge und Spannung. Doch war auch letztere durch

39. GAY-LUSSAC, JOSEPH LOUIS und LOUIS JACQUES THÉNARD: *Reserches physicochimiques, faites à l'occasion de la grande batterie . . .*, Paris 1811, 2 Bände. Der physikalisch interessante Teil auch in: *Annalen der Physik*, 32, (1809), S. 121–160.

40. OHM, GEORG SIMON und GUSTAV THEODOR FECHNER: *Das Grundgesetz des elektrischen Stromes. 3 Abhandlungen von G. S. Ohm (1825, 1826) und G. Th. Fechner (1829)*. Hrsg. C. Piel, Leipzig 1938 (Ostwald's Klassiker Nr. 244); hier G. S. Ohm S. 1, 8, 23, 28.

VOLTAs Identitätsarbeiten weit verbreitet, und jeder, der sich eingehend zumindest komparativ mit galvanischen Phänomenen – vor allem auch im Vergleich zu denen der Reibungselektrizität – befaßte, benutzte sie. Der Begriff Stromstärke als Ladungsmenge pro Zeit, der VOLTA selbst noch nicht sehr klar war, wurde jedoch bei keinem ausführlich benutzt oder genauer definiert und dabei gegen den Begriff Geschwindigkeit abgegrenzt. Daß hier das Vorbild der Newtonschen Hydrodynamik mit der Bewegung fester Körper in Flüssigkeiten das größte Hindernis bildete, zeigt der Beitrag JOHN GEORGE CHILDRENS<sup>41</sup>, der ansonsten sehr interessante Überlegungen enthält, die zur Problematik des Energieerhaltungssatzes gehören (Widerstand und Wärmeentwicklung).

VOLTAs bedeutendsten Einfluß kann man bei RITTER selbst feststellen. Bedeutend ist dieser Einfluß deshalb, weil RITTER als einziger über den Stand dieses Wissens hinauskam. So übernahm er VOLTAs Kontakttheorie mit dem Begriff Innenwiderstand, ohne wie dieser chemische Phänomene und Theorien unberücksichtigt zu lassen, ferner VOLTAs Begriffstrennung zwischen Ladungsmenge und Spannung. Doch entwickelte er selbständig und in den experimentellen Untersuchungen und Folgerungen über VOLTA hinausgehend den Ohmschen Zusammenhang. Die wichtigsten Gründe dafür, daß diese Erkenntnis RITTERs keine historische Wirkung zeigte, sind – neben sachlichen Schwierigkeiten wie bei VOLTA – sein geringeres wissenschaftliches Ansehen gegenüber VOLTA, das er sich zudem durch schwärmerische und mitunter haltlose Spekulationen bei den Fachwissenschaftlern bald verscherte, sein umständlicher, ausschweifender Stil und die Tatsache, daß seine physikalischen Ergebnisse meist in mehr physiologisch ausgerichteten Arbeiten versteckt waren. Schwer lesbar wurden seine Ergebnisse zusätzlich durch seine Hilflosigkeit, die ausgezeichneten Einfälle mathematisch auszudrücken.

### 5. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten in der Entwicklung der elektrischen Begriffe

Nachdem die Fragen D 1–4 (s. S. 64) schon für die Detailuntersuchungen wesentliche Anregungen gaben, können nun unter dieser Einteilung größere Linien in der Entwicklung verfolgt werden, die einige Gesetzmäßigkeiten erkennen lassen, wie sie auch für die Entwicklung anderer Bereiche der Physik bekannt sind. (Die Untersuchung eines der Elektrizitätsgeschichte sowohl zeitlich wie begrifflich sehr nahen Gebietes, der Geschichte der Wärmelehre, wäre allerdings – unter gleichem Blickwinkel – noch sehr wünschenswert.)

41. CHILDREN, JOHN GEORGE: *An account of some experiments with a large voltaic battery.* Gelesen 15. 6. 1815, in: *Philosophical Transactions*, (1815), S. 363–374.

Die Fragen sollen nun einzeln angeschnitten werden, ohne daß Anspruch auf vollständige Behandlung erhoben werden kann:

Zu D 1) Welche Bedeutung hat die mathematische Sprache in der Elektrizitätsgeschichte bis 1820 gehabt?

Die eine Entwicklungslinie von CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB 1785 bis SIMÉON-DENIS POISSON 1811 war speziell auf Frankreich beschränkt. Bei ihren Vertretern war die Mathematik souverän beherrschtes Handwerk. Doch war ihre Wirksamkeit – in starrer Analogie zur Mechanik – auf die Entwicklung der Elektrostatik begrenzt. Die Einengung auf die Forderung nach ‚exakten‘ Messungen und theoretischen Verfahren zeitigte dagegen einige Hilfslosigkeit gegenüber den spezifischen Problemen des elektrischen Stromes, wie etwa bei JEAN BAPTISTE BIOT 1801 zu sehen ist. Die andere Entwicklungslinie mit dem Verdienst der ‚elektrodynamischen‘ Begriffsbildung lief von BENJAMIN FRANKLIN (ab 1747), GIAMBATISTA BECCARIA (1753, 1772) bis zu ALESSANDRO VOLTA (1778–1802) und JOHANN WILHELM RITTER (1798–1808). Sie war die der reinen Experimentalphysiker, mit unvollkommener bis sehr schlechter Beherrschung der Mathematik. Der tiefere Grund für den fehlenden Kontakt zwischen den beiden Linien war die Klassifizierung der mathematisch behandelten Physikdisziplinen (v. a. Mechanik und geometrische Optik) unter Mathematik. Zwar war auch bei den Experimentalphysikern die mathematische Sprache wesentlicher Programmpunkt, doch fehlte ihnen die entsprechende Ausbildung. So konnte es z. B. noch bis nach 1800 von experimenteller Seite zu zahlreichen ungerechtfertigten Angriffen gegen das Coulombsche Gesetz kommen<sup>42</sup>.

HENRY CAVENDISH war der geniale Einzelgänger – aber eben deshalb besonders wirkungslos – der versuchte, sowohl elektrostatische Phänomene wie solche des elektrischen Stromes mit bestem mathematischen Rüstzeug und überragendem experimentellen Geschick zu bearbeiten. Sein Beispiel zeigt, welche Möglichkeiten bei einer etwas besseren mathematischen Ausbildung schon damals für die Theorie und die experimentelle Bearbeitung des Stromkreises bestanden hätten. Doch muß man auch die vorhandenen Leistungen der Experimentalphysiker anerkennen. (Siehe zu dieser Frage auch S. 83).

Zu D 2) Wie entwickelten sich durch die Kenntnis neuer Phänomene neue Begriffe und Meßvorschriften für sie? –

42. Siehe z. B. VOLTA, Anm. 22, S. 78/79. Ferner

OERSTED, HANS CHRISTIAN in: *Journal für Chemie*, 7, (1808), S. 374f.

MARÉCHAU, PETER LUDWIG in: *Annalen der Physik*, 25, (1807), S. 341 über RITTER.

PRECHTL, JOHANN JOSEPH in: *Annalen der Physik*, 35, (1810), S. 31.

SIMON, PAUL LOUIS in: *Annalen der Physik*, 28, (1808), S. 290.

PARROT, GEORG FRIEDRICH in: *Annalen der Physik*, 61, (1819), S. 274.

Im ersten Stadium jeder Theorie sind recht wenig Phänomene bekannt, das heißt, sie ist nur an wenigen Stellen mit der Erfahrung verknüpft. Es kann folglich Begriffe geben, für die keinerlei Meßvorschriften vorhanden sind, und die trotzdem zentrale Bedeutung haben. Das gilt etwa für den Strombegriff vor 1700. Er hatte hier zunächst einen ganz anderen Inhalt (als unmittelbare Ursache der elektrischen Anziehungskräfte) als der spätere Leiterstrom. Trotzdem ist es richtig, diesen Ansatz als Vorstufe ‚elektrodynamischer‘ Entwicklungen anzusehen, da im weiteren Verlauf der Geschichte vor 1745 – also noch im Rahmen der Ausströmungstheorie – mehrere Phänomene unter diesem Begriff subsumiert wurden (einschließlich des Leiterstroms), die auch im heutigen Sinne Stromvorgänge sind. Diese Vorentwicklung war ein Grund dafür, daß die Verankerung eines beweglichen elektrischen Fluidiums, gebunden an Leiter, durch FRANKLIN, CAVENDISH und andere so leicht fiel und damit die weitere Entwicklung ‚elektrodynamischer‘ Vorstellungen ab 1791 ziemlich selbstverständlich anließ. Schon vor einem plötzlichen Bruch, wie er in der Zeit von 1745–1771 mit der völligen Aufgabe der Ausströmungstheorie und damit dem ausschließlichen Konzept des Leiterstroms auftrat, kann also eine entsprechende Bedeutungsverschiebung von Begriffen in einem Modell auftreten, weil sie neuen Erfahrungen angepaßt werden müssen.

Je fester ein Begriff in einem Modell verankert ist, und je näher er schon weiter fortgebildeten Begriffen aus der Modellwissenschaft steht, mit desto größerer Wahrscheinlichkeit wird nach Meßvorschriften für ihn gesucht werden, um das ganze Modell zu sichern. (Die Versuche zur Bestimmung der Elektrizitätsgeschwindigkeit gehören hierhin.) Das muß aber nicht sein. So wurde die Meßvorschrift für den Dichtebegriff, der auf Grund des mechanischen Modells schon einige Zeit verwendet worden war, recht zufällig entdeckt: schon bekannte Meßvorschriften paßten nicht mehr für den Begriff Ladungsmenge, sondern nur für den Begriff Dichte, weil die Anzeige der entsprechenden Meßinstrumente nicht mit der größeren Ladungsmenge auf verschieden großen Kondensatoren wachsen mußte, sondern entsprechend der Modellvorhersage für die Dichte konstant bleiben konnte. Der Begriff der Spannung bei CAVENDISH, BECCARIA und VOLTA verdankt seine Entstehung – sehr wahrscheinlich – allein dieser Diskrepanz verschiedener Messungen mit den Vorhersagen des ursprünglichen Modells und nicht etwa einer abstrakten Überlegung zur Analogie zwischen Elektroskop und Druck- bzw. Dichtemesser bei Flüssigkeiten bzw. Gasen.

Man kann an Hand des Beispiels Spannung feststellen, daß nicht versucht wurde – und nicht versucht werden muß – für jede neue Größe eine vollständige Meßvorschrift aufzubauen, sofern jene sicher in eine Theorie eingebaut wurde, d. h. eine ganze Reihe Folgerungen erlaubt, die ihrerseits experimentell bestätigt werden können. In diesem Fall kann eine unvollständi-

ge Meßvorschrift (zur Gleichheit zweier Werte der Größe, vielleicht noch zum komparativen Vergleich) zunächst völlig ausreichen. So war viel verdienstvoller als sein häufig wiederholter Versuch zur Eichung von Elektrometern die Entscheidung VOLTAs, den komparativen Begriff Spannung (mit dem der Ladungsmenge bzw. ihrer Geschwindigkeit) auf die Vorgänge um LUIGI GALVANI'S Entdeckung anzuwenden (ähnlich wie die Entscheidung CAVENDISHs, ihn 1776 zur Erklärung der Wirkungen des Zitterrochens zu benutzen).

Zu D 3) Wie komplex sind die Gesetzesansätze, von denen zunächst ausgegangen wurde?

Hier kann man für den größten Teil der Entwicklung tatsächlich sagen: Es wurden möglichst einfache Begriffe und Allaussagen gewählt, die mit den Tatsachen vereinbar waren. So wurde etwa der Widerstand (mit der Ausnahme bei CAVENDISH) sofort als Materialkonstante angenommen. Ähnliches gilt für seine Proportionalität zu Länge und Kehrwert des Querschnitts, ferner für die Gesetze: Kapazität  $\sim$  Fläche/Abstand der Kondensatorplatten, Ladungsmenge  $\sim$  Kapazität  $\times$  Spannung und Stromstärke  $\sim$  Gesamtleitwert  $\times$  Spannung.

Es zeigt sich, daß alle Forscher mit fruchtbaren Beiträgen zur Elektrizitätslehre so vorgehen, obwohl dieses gleiche Vorgehen mitunter unterschiedlich motiviert wurde. Der Rationalismus betonte, daß die Welt rational und deshalb rationell aufgebaut sei, so daß sich möglichst einfache Gesetze ergeben müßten. Die romantische Naturphilosophie sah in der Vielfalt der Natur nur das Spiel eines ständig wandelbaren einfachen Einen, auf das alles zurückführbar sei. Doch sind bei der Berücksichtigung experimenteller Tatbestände, solange sie noch nicht quantitativ exakt ermittelt sind, Wertungen nötig, die dann verschieden einfache Antworten zur Folge haben können. Ferner können andere Analogien andere Antworten nahelegen. Beides ist auch in der Elektrizitätsgeschichte zu beobachten. Letzteres gilt etwa bei CAVENDISH: Auf Grund seines Modells mußte er den Widerstand zunächst proportional zu einer Potenz der Geschwindigkeit ansetzen, ließ allerdings die Möglichkeit der Potenz 1 offen und nahm schließlich diese auf Grund experimenteller Ergebnisse auch an. Bei CAVENDISH spielt allerdings mit, daß er als einziger der behandelten Wissenschaftler öfters versuchte, nicht möglichst einfache, sondern zunächst möglichst allgemeine Gesetze aufzustellen, und daß er diese dann durch theoretische oder experimentelle Untersuchungen vereinfachte. Das dürfte wohl allgemein ein Zeichen für einen durch die theoretischen Möglichkeiten der Wissenschaftssprache besonders faszinierten Forscher sein. — Ersteres finden wir in dem Zögern vieler Forscher, die VOLTA – RITTERSche Entdeckung, daß die Stromstärke bei konstanter Spannung der Voltasäule nur eine Funktion von Innen- und Außenwiderstand sei, anzunehmen. Man glaubte eben, daß die chemi-

schen Erscheinungen zusätzliche Begriffe nötig machten. Man kann es auch so ausdrücken: der Gültigkeitsbereich des Begriffs elektrischer Widerstand über die Spezialwissenschaft Physik hinaus war noch nicht abgegrenzt.

Einfache Annahmen sind ein Hilfsmittel, möglichst einfach über meist komplizierte Phänomene zu reden, was die gegenseitige Verständigung und den widerspruchsfreien Ausbau des Modells durch kompliziertes Folgern erleichtert. Sie sind also immer berechtigt, wenn die Experimente nicht widersprechen (sei es auch nur aus Gründen der Meßungenauigkeit oder weil überhaupt nur komparative Erfahrungen vorhanden sind) und wenn man sich über die Abgrenzung zu eventuellen Alternativen klar ist, ferner darüber, wieviel Information aus den vorhandenen experimentellen Mitteln überhaupt zu ziehen ist, sowie über eventuelle theoretische Annahmen, die implizit in den einfachen Ansätzen stecken. Doch gerade letztere zwei Forderungen wurden von den meisten Wissenschaftlern nicht erfüllt.

Zu D 4) Welche neuen Erklärungen und experimentellen Ansätze wurden durch theoretische Entwicklungen möglich bzw. behindert?

Je besser ein Forscher mit einem gesicherten Modell, etwa der Newtonschen Mechanik, und vorhandenen oder selbst geschaffenen empirischen Daten umgehen kann, d. h. je besser er die wissenschaftstheoretischen Forderungen D 1–4) erfüllt, desto vollkommener wird seine Theorie sein. Wichtig ist gerade auch das Wissen um scheinbar weniger bedeutsame Details in der Modellwissenschaft, so etwa um die rein theoretische Erörterung NEWTONs über die Kraftwirkung in einer mit Masse belegten Kugelschale (vgl. Anm. 13). Sie führte CAVENDISH zu seinen originellen und wichtigen Experimenten zum Nachweis des elektrostatischen Kraftgesetzes, das anderen (z. B. BECCARIA und VOLTA) so viel Schwierigkeiten bereitete. Hier konnte im übrigen eine theoretische Entwicklung direkt Ansatzpunkt für ein neuartiges Experiment werden. Erfolgreiche Analogien können auch zu Dogmen werden, die den Blick für Wesentliches trüben. Das beste Beispiel liefert VOLTAs Kontakttheorie, (doch könnte man auch den Begriff der Geschwindigkeit sowie RITTERs romantische Analogien anführen). Ihr war vor allem die Erklärung der galvanischen Erscheinungen als rein physikalisch sowie die so nützliche Beschränkung auf drei Begriffe im Stromkreis zu danken. Doch trübte sie VOLTAs Blick für die elektrochemischen Erscheinungen. Diese Gefahren sind im allgemeinen umso größer, je erfolgreicher eine Analogie ist, je älter und anerkannter der Wissenschaftler ist und je größer der Leitcharakter der Modellwissenschaft ist.

Es soll nun noch einmal die Bedeutung der Wechselwirkung zwischen Modellvorstellungen und experimentellen Ergebnissen betont werden. Neue Phänomene können zwar Begriffe anregen, doch nur, wenn diese auf Grund von Modellvorstellungen schon irgendwie angedeutet sind. Ihr Wert wird

durch die experimentelle Bestätigung bedeutend gesteigert. Nun können von hier wieder Anregungen zu neuen Experimenten oder zur Erklärung neuentdeckter Phänomene ausgehen usw. Es kann schließlich eine Resonanz zwischen den Überlegungen am Modell und den Experimenten dazu eintreten. So ist es — unter anderem — erklärlich, warum die Elektrizitätslehre von den ersten Entdeckungen der Antike bis zu den ersten genaueren Untersuchungen (1550, 1600), von dort bis zu ausführlicheren Experimenten (kurz nach 1700 durch FRANCIS HAUKS BEE), von hier bis zum Kondensatorprinzip (1745), von da bis zum Spannungsbegriff und Kraftgesetz (ab 1771), von dort bis zur GALVANI-VOLTAschen Entdeckung von 1791/1792, von hier bis zur Voltasäule (1799) und von ihr bis zum Ohmschen Gesetz (ab 1802) in immer kürzeren Abständen sowohl von der Theorie wie vom Experiment wichtige Impulse erhielt. 1802 bis 1820 verlangsamte sich das Tempo zunächst durch das Auftauchen der schwierigen elektrochemischen Probleme, die in Theorie und Experiment eine Reihe von widersprüchlichen Antworten zuließen. Andererseits blieb die Entwicklung der Elektrostatik zu POISSONs Arbeiten von 1811 isoliert.

Mit dem Jahr 1820 war diese Frühperiode der begrifflichen Entwicklung in der Elektrizitätslehre abgeschlossen. Denn die Entwicklung des Elektromagnetismus übertraf an Bedeutung alle vorhergehenden Ereignisse in der Elektrizitätslehre. Zwei völlig getrennte Wissensgebiete mußten nun zusammengesehen werden. Zusätzlich forderten die mechanischen Wirkungen des Magnetfeldes des elektrischen Stromes eine stärkere quantitative Behandlung der Stromvorgänge mit Hilfe erprobter Begriffe aus der Mechanik, sowie eine Verknüpfung von elektrostatischer und ‚elektrodynamischer‘ Theorie. Mit diesen Problemen waren die folgenden Jahrzehnte bis CLERK MAXWELL beschäftigt.

### Spezielle Sekundärliteratur

BROWN, THEODORE M: *The electric current in early Nineteenth-Century French Physics*, in: *Historical Studies in the Physical Sciences*, Philadelphia 1 (1969), S. 61–105).

COHEN, I. BERNARD: *Franklin and Newton. An inquiry into speculative Newtonian experimental science and Franklin's work in electricity as an example thereof*, Philadelphia 1956.

GUERLAC, HENRY: *Francis Hauksbee: experimentateur au profit, de Newton*, in: *Archives internationales d'Histoire des Sciences*, A 16, (1963), S. 113–128.

HOME, RODERICK WEIR: *The effluvial theory of electricity*, Bloomington, Indiana 1967 (University Microfilms ,Ann Arbor, Michigan).

HOME, RODERICK WEIR: *Francis Hauksbee's theory of electricity*, in: *Archive for History of Exakt Sciences*, 4, (1967/68), S. 203–217.

HUMPHREYS, A. W.: *The development of the conception and measurement of electric current*, in: *Annals of Sciences*, 2, (1937), S. 164–178.

KING, W. JAMES: *The quantification of the concepts of electric charge and electric current* – Part I, in: *The Natural Philosopher*, 2, (1963), S. 105–127.

KUHN, THOMAS S.: *The function of measurement in modern physical science*, in: *Isis*, 52, (1961), S. 161–193.

KUHN, THOMAS S.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a. M. 1967.

MCCORMMACH, RUSSELL KEITH: *The electrical researches of Henry Cavendish*, Cleveland, Ohio 1967 (University Microfilms, Ann Arbor, Michigan 1969).

PACE, ANTONIO: *Benjamin Franklin and Italy*, Philadelphia 1958.

ROLLER, DUANE UND DUANE H. D. ROLLER: *The prenatal history of electrical science*, in: *American Journal of physics*, 21, (1953), S. 343–356).

ROLLER, DUANE UND DUANE H. D. ROLLER: *The development of the concept of electric charge. Electricity from the Greeks to Coulomb*, in: *Harvard Case Histories in Experimental Science*, 2, (1957), S. 541–639.

SCHOFIELD, ROBERT E.: *Electrical Researches of Joseph Priestley*, in: *Archives internationales d'Histoire des Sciences*, A 16, (1963), S. 277–286.

WALKER, W. CAMERON: *The detection and estimation of electric charges in the eighteenth century*, in: *Annals of science*, 1, (1936), S. 66–100.

## Summary

This essay examines the development of concepts in the field of electricity up to 1820 with emphasis on the period from 1771 (first publication of Henry Cavendish on electricity) to 1820, and on the concepts with regard to electric current (resistance, voltage, amount of charge/time). It is shown, that current-models developed early, which after the discovery of the condenser principle in 1745/46 were limited to circuit models analogous to hydrodynamics and which inspired the examination of the concept of resistance leading to a separation of the concepts of quantity and intensity. After 1791, Alessandro Volta with the help of these concepts succeeded in proving the identity of galvanic and electrical phenomena. He outlined Ohm's Law (1802) almost simultaneously with Johann Wilhelm Ritter. Ritter even extended these experiments. However, until 1820, both findings were given little or no attention.



## Lebenslauf

Am 7. 6. 1941 wurde ich, Jürgen Teichmann, als 1. Kind des Magazinverwalters Joachim Teichmann und seiner Ehefrau Erna, geborene Molitor, in Hindenburg (Oberschlesien) geboren. Ab 1945 wuchs ich in Amberg (Oberpfalz) auf, wo ich die Volksschule und Oberrealschule (bis 1957) besuchte. Ab 1957 bis 1960 lebte ich in Hamm (Westfalen), wo ich Ostern 1960 mein Abitur am Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Gymnasium bestand.

Nach einem Jahr Wehrdienst begann ich im Sommersemester 1961 mit dem Studium der Physik an der Universität Münster (Westfalen) und setzte es ab Sommersemester 1962 an der Ludwig-Maximilians-Universität München fort. Hier bestand ich im Wintersemester 1963/64 mein Vordiplom mit der Gesamtnote gut, im Sommersemester 1967 mein Diplom (mit einer experimentellen Diplomarbeit) mit der Gesamtnote sehr gut.

Im Wintersemester 1967/68 begann ich mit meiner Dissertation am Institut für Geschichte der Naturwissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München. Nebenamtlich gab ich Unterricht in Mathematik und Physik an einem Münchener Privatgymnasium. Am 1. 1. 1970 wurde ich wissenschaftlicher Assistent am Forschungsinstitut für die Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik des Deutschen Museums.





